

# DE IMPACT VAN GEBRUIKSPROFIELEN OP DE INTEGRATIE VAN FOTOVOLTAÏSCHE SYSTEMEN VOOR LAGE-ENERGIE WONINGEN

R. Baetens<sup>1</sup>, R. De Coninck<sup>2,4</sup>, B. Verbruggen<sup>3</sup>, J. Driesen<sup>3</sup>, L. Helsen<sup>2</sup> and D. Saelens<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Afdeling Bouwfysica, Departement Burgerlijke Bouwkunde

<sup>2</sup> Afdeling Toegepaste Mechanica en Energieconversie, Departement Werktuigkunde

<sup>3</sup> Afdeling Elektrische Energie en Computer Architecturen, Departement Elektrotechniek

<sup>1,2,3</sup> K.U.Leuven, B-3000 Leuven, België

<sup>4</sup> 3E nv, BE-1000 Brussel, België

## ABSTRACT

In lage-energie woningen is het mogelijk om met hernieuwbare energie de totale jaarlijkse energievraag te dekken. Er bestaat echter vaak een probleem van een gebrek aan gelijktijdigheid tussen de energielevering en –vraag, waardoor het elektriciteitsnet aangesproken wordt als virtuele opslag. Dit onderzoek heeft als doel de impact van gebruiksprofielen in huishoudens op de integratie van fotonvoltaïsche (PV) systemen te evalueren in een Belgisch klimaat.

Daartoe werd in TRNSYS een multi-zone woning gemodelleerd met een gebouwgeïntegreerd PV-systeem, een selectie van elektrische toestellen, verlichting en elektrisch gegenereerde ruimteverwarming en sanitair warm water door middel van een warmtepomp. Het niet gelijktijdig zijn van vraag en aanbod resulteert in elektriciteitsproductie die terug in het net wordt geïnjecteerd. Deze gelijktijdigheid wordt begroot door een dekkingsgraad. Om de gelijktijdigheid te bestuderen is het eveneens van belang om zeer korte simulatiestapjes te modelleren. Het model wordt gebruikt om eventuele struikelblokken te visualiseren voor een mogelijke grootschalige toepassing van gebouwgeïntegreerde PV-systemen. Het totaal gevraagde vermogen voor huishoudelijke toestellen en verwarming piekt typisch 's morgens en 's avonds, terwijl de output van de PV-installatie vooral de lokaal beschikbare zoninstraling volgt. Door deze elektrische vraag en generatievermogens tegen elkaar uit te zetten wordt duidelijk getoond dat de elektriciteitsvraag om te verwarmen en de huishoudelijke elektriciteitsvraag niet overeenkomen met de door PV gegenereerde stroom.

## INLEIDING

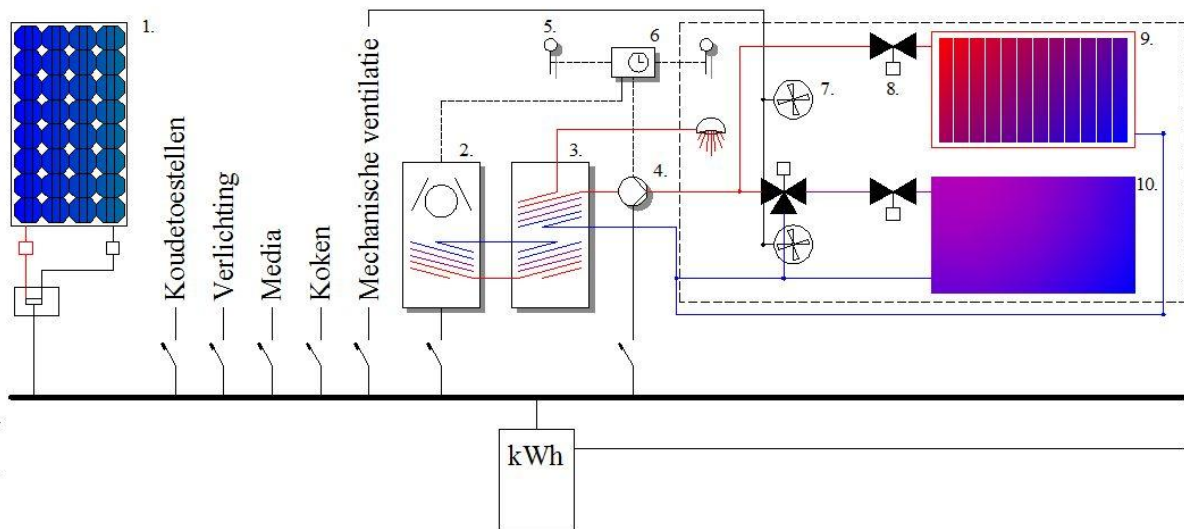
Een herziening door het Europese Parlement van de richtlijn 2002/91/EG betreffende energieprestaties voor gebouwen [1] verplicht de EU-lidstaten om vanaf het jaar 2020 enkel nog *bijna-nul energie* gebouwen te bouwen. Ondanks de onduidelijke definitie van de termen *bijna-nul energie* en *nul energie* gebouwen [2][3], zal dit ertoe (moeten) leiden dat het aandeel hernieuwbare energie in het gebouwbestand zal toenemen om de vraag aan fossiele brandstoffen te doen dalen. In een regio zoals Vlaanderen of België blijkt het gebruik van warmtepompen, zonneboilers en fotonvoltaïsche (PV) panelen hiervoor het aantrekkelijkst of meest aangewezen. Vandaag merken we reeds een stijgend van deze technologieën in de residentiële sector [4][5].

In lage-energie woningen kan hernieuwbare energie de totale jaarlijkse energievraag dekken. Echter ontstaat er een probleem van gebrek aan gelijktijdigheid tussen de energielevering en -vraag, waarbij het elektriciteitsnet als virtuele opslag wordt gebruikt. Een hoog aandeel aan PV en/of warmtepompen kan voor een piekleveringen of -vraag aan het grid zorgen, wat kan leiden tot problemen inzake de stabiliteit van het elektriciteitsnet [6][7][8] binnen een korte(re) tijdschaal.

Ter kwantificatie van het verschil tussen de energievraag van een woning en de energielevering door een PV-systeem is een multi-zone TRNSYS model [9] van een woning gemaakt, waarin stochastisch huishoudelijke gebruikers, verlichting en elektrisch gegenereerde ruimteverwarming en sanitair warm water door middel van een lucht-water warmtepomp zijn geïntegreerd.

## MODEL

In TRNSYS werd een multi-zone woning met een gebouwgeïntegreerd PV-systeem, een selectie van elektrische toestellen, verlichting en elektrisch gegenereerde ruimteverwarming en sanitair warm water door middel van een warmtepomp met opslagvat gemodelleerd (figuur 1). Het gebruik van de elektrische toestellen en de aanwezigheid van bewoners zijn hierbij stochastisch gemodelleerd op basis van bestaande literatuur zoals verder uiteengezet.



*Figuur 1 Schematische voorstelling van de gesimuleerde woning. Binnen de woning zijn een geïntegreerd PV-systeem (1), een elektrische lucht-water warmtepomp (2) voor ruimteverwarming en sanitair warm water, een opslagtank (3), een circulatiepomp voor verwarming (4), de kamerthermostaat (6) met buitensensor (5), mechanische ventilatie (7), thermostatische kranen (8), lage-temperatuurradiatoren (9) en een vloerverwarmingssysteem (10) gemodelleerd en gesimuleerd.*

### Het gebouw en zijn installaties

Een lage-energie vrijstaande woning is gemodelleerd ter simulatie van het profiel van de elektriciteitsvraag (figuur 2). De woning is gemodelleerd als een multi-zone gebouw in TRNSYS [9] waarbij elke ruimte een afzonderlijke thermische zone vormt. De woning heeft een bruikbare oppervlakte van 210 m<sup>2</sup>, een dakoppervlak van 270 m<sup>2</sup>. De gebouwschil heeft U-waarden van 0.17, 0.20 en 1.17 W/(m<sup>2</sup>K) voor respectievelijk de gevel, het dak en de vensters. De woning wordt geventileerd met een mechanische balansventilatie met ventilatiedebiet van 175 m<sup>3</sup>/h. Het ventilatiesysteem is uitgerust met een warmtewisselaar met een rendement van 70 %. De aan- en afvoerventilator hebben elk een vermogen van 95 W. Interne warmtewinsten van 8 W/m<sup>2</sup> door de aanwezigheid van mensen en de elektrische toestellen zijn in rekening gebracht op basis van een vereenvoudigd dag- en nachtprofiel.

Omwille van de beperkte warmtevraag van de woning is het mogelijk om een lage-temperatuursverwarming in combinatie meteen elektrische lucht-water warmtepomp te gebruiken voor zowel de ruimteverwarming als het sanitair warm water. De woning werd gesimuleerd met drie verschillende warmteafgiftesystemen:

- Vloerverwarming (FH) gedimensioneerd volgens [10][11]. De regeling gebeurt via een vloersensor en kamerthermostaat in elke ruimte. De stooklijn verloopt lineair van 43°C tot 20°C bij een buitentemperatuur tussen -8°C en 20°C.
- Lage-temperatuurradiatoren (R) gedimensioneerd volgens [10][12]. De regeling gebeurt via thermostatische kranen. De stooklijn verloopt lineair van 55°C tot 20°C bij een buitentemperatuur tussen -8°C en 20°C.
- Een combinatie (C) van vloerverwarming en lage-temperatuurradiatoren. De vloerverwarming is gedimensioneerd voor een basisverwarming van 16°C terwijl de radiatoren de temperatuur verder optrekken tot een comfortniveau van 21°C. De dimensionering gebeurde op basis van [10][11][12]. De stooklijn verloopt lineair van 55°C tot 20°C bij een buitentemperatuur tussen -8°C en 20°C waarbij de lagere temperaturen voor de vloerverwarming behaald worden m.b.v. een driewegkraan. De regeling gebeurt via een vloersensor en kamerthermostaat in elke ruimte.

De installatie voor warmteproductie bestaat uit een buffvat met een geïntegreerde warmtewisselaar voor sanitair warm water en een elektrisch aangedreven lucht-water warmtepomp met een nominaal vermogen van 10.0 kW en COP van 4.26 bij nominale condities. De regeling van de warmtepomp gebeurt op basis van twee sensoren in het buffervat: (i) een sensor halverwege de tank waarbij het instelpunt gelijkgesteld is aan de stooklijn op basis van de buitentemperatuur (regeling voor ruimteverwarming) en (ii) een sensor bovenaan de tank waarbij het instelpunt gelijk is aan 50°C (regeling voor sanitair warm water). Aan beide eisen dient tegelijk voldaan te zijn. Stochastische afnameprofielen voor het sanitair warm water zijn gegenereerd volgens (i) het

aanwezigheidsprofiel [13] en (ii) de dagelijkse waarschijnlijkheid [14][15] van kleine afnames, douchen en baden.

Het instelpunt voor de operationele temperatuur is gelijkgesteld aan 21°C. De regeling van de ruimteverwarming gebeurt op basis van het stochastische aanwezigheidsprofiel [13] waarbij wordt aangenomen dat de bewoners de verwarming manueel aanzetten wanneer zij thuiskomen of opstaan. Deze aanname is gedaan om later de mogelijke verbetering door een aangepaste sturing vanuit installatie- of netwerkstandpunt te kunnen duiden.

Verschillende tankgroottes van 0.5 tot 4.0 m<sup>3</sup> zijn in rekening genomen. Vaten van deze formaten worden zelden toegepast in gelijkaardige gebouwen, echter de mogelijkheid om thermische buffers te gebruiken kan een belangrijke rol spelen in de optimalisatie van gedistribueerde energieopwekking binnen slimme elektriciteitsnetwerken.

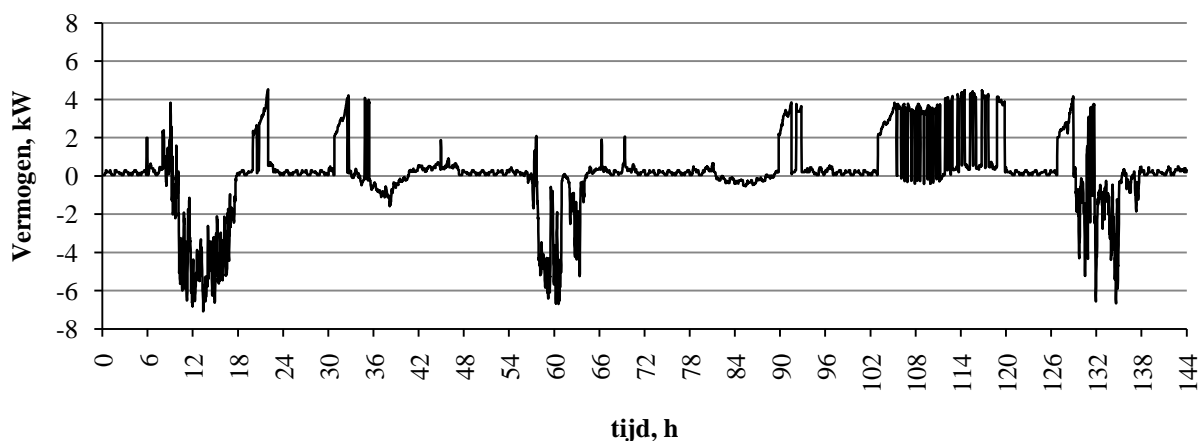
### Gebruiksprofielen

Naast de elektriciteitsvraag voor ruimteverwarming, sanitair warm water en mechanische ventilatie is een stochastische aanwezigheidsprofiel [13] en een stochastisch gebruiksprofiel voor het gebruik van huishoudtoestellen geïncorporeerd. De huishoudelijke gebruikers die in rekening werden gebracht zijn het standby verbruik [16] en het verbruik van koelkast en diepvriezer [17][18], verlichting [19], het gebruik van elektrische toestellen om te koken [20][21] en het gebruik van computer en televisie [20][22]. Voor het modelleren van verlichting is het origineel model [19] gekoppeld met de minuutwaarden van de globale illuminatie verkregen met Meteonorm [23] voor Ukkel (België). Het gebruik van wasmachine, droogkast en vaatwasser werd niet gemodelleerd vanwege een gebrek aan statistische gegevens i.v.m. hun gebruiksprofielen.

De electriciteitsgeneratie door de PV-panelen is gemodelleerd met TRNSYS Type 194 [9] waarin het 5-parameter model van de onderzoeksgroep van Beckham is geïmplementeerd [24]. De positie van de PV-panelen werd gekozen om een maximale output op jaarbasis te bekomen voor de klimaatdata van Ukkel (België), zijnde een inclinatie van 34° en gericht op het zuiden [25]. Minuutwaarden voor de diffuse en directe zoninstraling op het vlak van de PV-panelen werden gegenereerd met Meteonorm [23] voor Ukkel (België). Verschillende groottes van de PV-installatie van 1 tot 16 kWp zijn gesimuleerd.

### Beperkingen van de randvoorwaarden en het model

Het resulterend jaarlijks gemiddelde elektriciteitsverbruik exclusief de energievraag voor warmteproductie in de gemodelleerde woning bedraagt 2.4 MWh. Het gemiddeld jaarlijks verbruik in België bedraagt 3.5 MWh [26]. Het verschil kan verklaard worden door drie factoren: (i) de invloed van elektrisch gegenereerd sanitair warm water in de statistieken, (ii) kleinere elektrische toestellen die niet gemodelleerd zijn in dit werk en (iii) de energievraag van wasmachines en vaatwassers die een jaarlijks verbruik van 0.7 MWh met zich meebrengen [27].



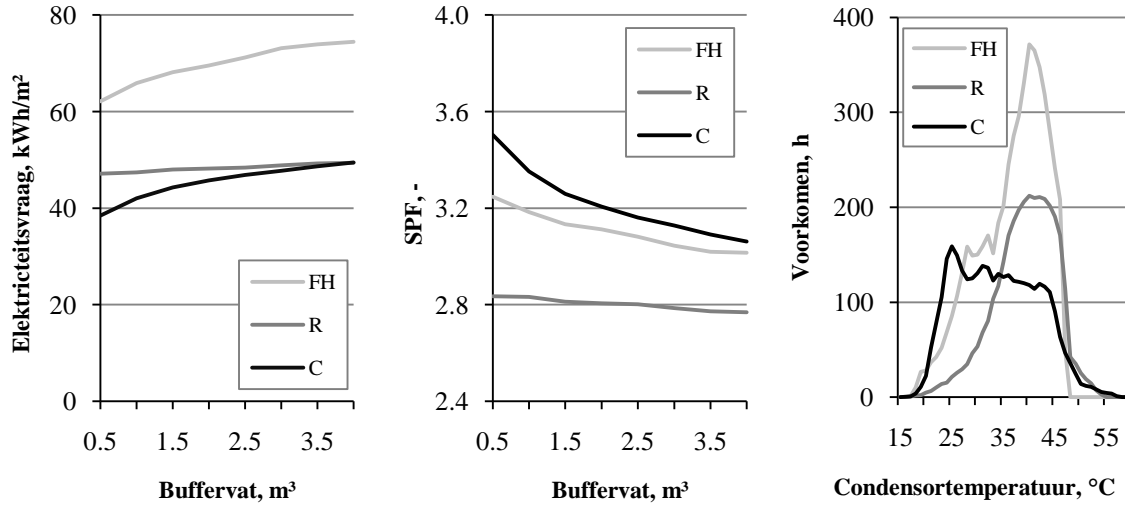
*Figuur 2 Voorbeeld weekprofiel van de gemodelleerde elektriciteitsbalans in het tussenseizoen. Positieve waarden duiden op een energievraag, negatieve waarden op een energielevering.*

## RESULTATEN

### Energievraag en thermisch comfort

Hoewel thermisch comfort niet het onderwerp van dit werk is, moet benadrukt worden dat - doordat een combinatie van verschillende verwarmingssystemen en installaties gemodelleerd zijn met eenzelfde regelstrategie - niet in alle situaties een gelijk niveau van thermisch comfort behaald wordt. De geïmplementeerde regelstrategie zorgt ervoor dat kortstondige comfortproblemen opduiken bij de trage vloerverwarming. De

gemiddelde binnentemperatuur bij aanwezigheid van de bewoners bedraagt hier 19.5°C, waarbij deze respectievelijk 20°C en 20.5°C bedragen bij radiatoren of een combinatie van beide. Eveneens werd een hoger thermisch comfort vastgesteld bij het gebruik van grotere opslagtanks.



*Figuur 3 Totale jaarlijkse elektriciteitsvraag (kWh/m²) voor ruimteverwarming en sanitair warm water [links] en de resulterende seizoensprestatiefactor SPF (-) [rechts] van de warmteproductie voor de verschillende afgiftesystemen en groottes van opslagtank.*

*Figuur 4 Verdelingscurve voor de condensortemperatuur voor de verschillende geïmplementeerde warmteafgiftesystemen bij een tankvolume van 0.5 m³.*

De totale elektriciteitsvraag (figuur 3) varieert van 40 tot 75 kWh voor ruimteverwarming en sanitair warmwater, afhankelijk van het warmteafgiftesysteem en de grootte van het opslagtank.

De resulterende seizoensprestatiefactor SPF (-) gedefinieerd als de verhouding van de totaal geleverde warmte tot de elektriciteitsvraag van de warmtepomp en circulatiepomp varieert tussen 3.5 en 2.8. De resultaten tonen een dalende SPF met stijgend tankvolume. De combinatie van vloerverwarming en radiatoren toont een hogere SPF dan een systeem met enkel vloerverwarming of radiatoren. De reden kan gevonden worden in de lagere condensortemperaturen (figuur 4) door een betere stratificatie in het buffervat. De langere werkingstijden voor de vloerverwarming zorgen voor hogere opslagtemperaturen doordat het steeds opnieuw gevuld wordt met water aan de retourtemperatuur van de vloerverwarming. Doordat de condensortemperatuur stijgt, daalt de SPF en het thermisch vermogen. Hierdoor haalt de warmtepomp niet het gevraagde setpunt van 50°C opgelegd aan de bovenzijde van het opslagtank, waardoor water aan een steeds lagere temperatuur in het vat wordt gevoegd en stratificatie in het vat verloren gaat.

#### Dekkingsgraad $\gamma$ van het PV-systeem

De effectiviteit waarmee de PV-installatie de elektriciteitsvraag aan het net kan doen dalen wordt bepaald aan de hand van de dekkingsgraad van het systeem. In deze context worden de dekkingsgraden  $\gamma_D$  en  $\gamma_S$  (-) gedefinieerd als 'de verhouding van het door het PV-systeem gedekte vermogen tot het totaal gevraagde vermogen' en 'de verhouding van het door het PV-systeem gedekte vermogen tot het totaal geproduceerde vermogen'

$$\gamma_D^{[t_1, t_2]} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \min\{P_{PV}, P_D\}}{\int_{t_1}^{t_2} P_D} \quad \text{and} \quad \gamma_S^{[t_1, t_2]} = \gamma_{PV}^{[t_1, t_2]} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \min\{P_{PV}, P_D\}}{\int_{t_1}^{t_2} P_{PV}} \quad (1)$$

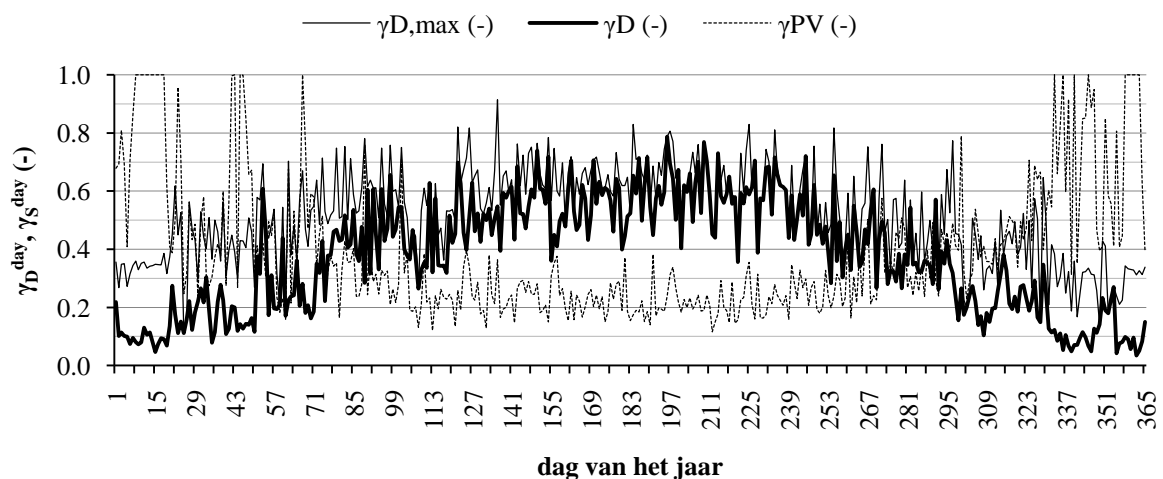
waarbij  $P_{PV}$  (W) het door het PV-systeem geleverde vermogen is en  $P_D$  (W) het totaal gevraagde elektrisch vermogen is. De term  $\min\{P_{PV}, P_D\}$  stelt het deel van het gevraagde vermogen voor dat rechtstreeks gedekt of geleverd wordt door het PV-systeem.

In een business-as-usual situatie waarbij geen poging is gedaan om de vraag en het aanbod van het PV-systeem op elkaar af te stemmen, kan een maximum waarde  $\gamma_{D, \max}$  (-) worden gedefinieerd op basis van de lengte van de dag. De lengte van de dag (zijnde tussen zonsopgang en -ondergang) bepaalt de maximum periode waarin

levering door het PV-systeem mogelijk is en de resulterende maximum elektriciteitsvraag die gedekt kan worden onafhankelijk van de grootte van het PV-systeem of dus 'bij een oneindig grote PV-installatie'.

Zowel  $\gamma_D$ ,  $\gamma_{D,max}$  en  $\gamma_S$  (-) tonen een seizoensafhankelijkheid (zie figuur 5). De seizoensafhankelijkheid van  $\gamma_D$  en  $\gamma_{D,max}$  (-) kan worden verklaard door de wijzigende lengte van de dag. Tijdens de winter zullen de pieken in elektriciteitsvraag in de ochtend en avond (wanneer de bewoners thuis zijn) vaak buiten de periode vallen waarbij levering door het PV-systeem mogelijk is. De seizoensafhankelijkheid van  $\gamma_S$  (-) kan verklaard worden door hogere stralingsintensiteit op het PV-systeem in de zomer vanwege langere dagen en een hogere zonnestand.

Figuur 5 geeft eveneens aan dat - zelfs bij een nul-energie woning - zowel in de zomer als in de winter het elektriciteitsnet nodig is. Het wordt immers gebruikt als virtuele opslag om de energievraag op een ander moment van de dag of het jaar te dekken. Mogelijke gevolgen van het gebruik van het net als virtuele opslagruimte is lokale instabiliteit van het net.



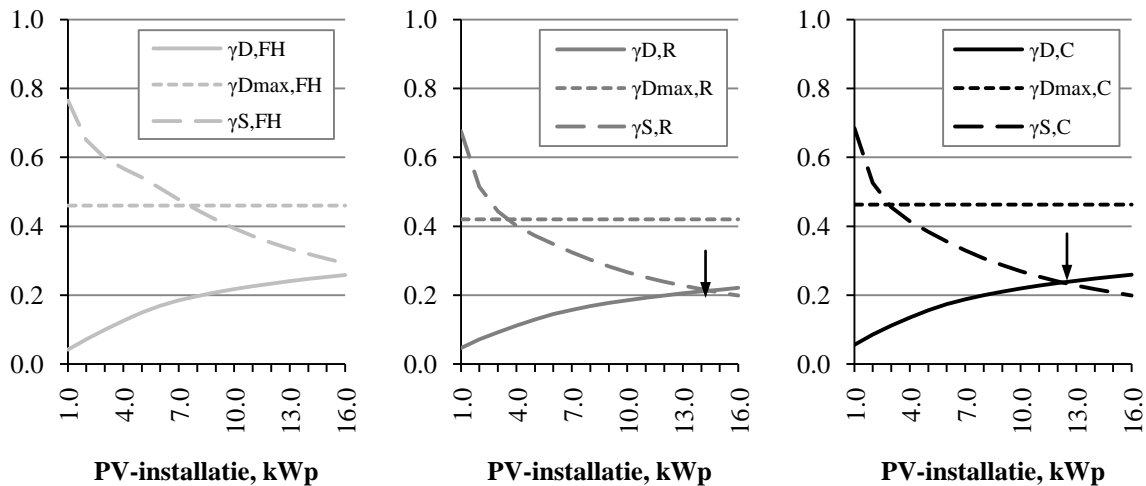
Figuur 5 Dekkingsgraden  $\gamma_D$ ,  $\gamma_{D,max}$  en  $\gamma_S$  (-) bepaald op dagelijkse basis voor een woning met radiatoren en een warmtepomp voor ruimteverwarming en sanitair warm water doorheen het jaar bij een PV-installatie van 14 kW (i.e. een nul-energie woning waarvoor de totale jaarlijkse energievraag gelijk is aan de jaarlijkse levering).

#### Invloed van de grootte van het PV-systeem

Vanzelfsprekend (figuur 6) heeft de grootte van het gebouwgeïntegreerde PV-systeem een grote invloed op de dekkingsgraden aangezien het de maximale vermogensoutput van het systeem bepaalt.

De kruising tussen  $\gamma_D(P_{pv})$  en  $\gamma_S(P_{pv})$  - aangeduid met een pijl in figuur 6 - stemt overeen met nul-energie woning binnen de definitie dat op jaarbasis de totaal geleverde energie gelijk is aan de totaal gevraagde energie. Het nodige ontwerpvermogen van de PV-installatie om dit te bereiken is enkel afhankelijk van de totale energievraag, waarbij de resulterende dekkingsgraad sterk zal afhangen van het gebruiksprofiel van de bewoners, de aanwezige installaties en hun regelstrategie. De combinatie van vloerverwarming en radiatoren toont hierbij de kleinste nood aan een grote PV-installatie door de laagste energievraag en tegelijk ook een hogere dekkingsgraad bij nul-energie in vergelijking tot de implementatie van radiatoren.

Het systeem met vloerverwarming (samen met het gebruik van huishoudelijke toestellen) toont zowel een hogere  $\gamma_D(P_{pv})$  als  $\gamma_S(P_{pv})$  in vergelijking met beide andere systemen. De totale vermogensvraag gedekt door de aanwezige PV-installatie ligt een factor 1.6 hoger, zoals ook kan worden afgelezen in de hogere  $\gamma_S$  met dezelfde waarde. Twee redenen kunnen hiervoor aangehaald worden. Enerzijds kunnen dezelfde redenen die verantwoordelijk zijn voor de lagere SPF van het vloerverwarmingssysteem voor een hogere dekkingsgraad zorgen. De aangehaalde hogere condensortemperaturen verlagen het vermogen van de warmtepomp waardoor lagere elektrische vermogens en een langere, constantere (doch minder efficiënte) werking optreedt die beter overeenkomt met het geleverde PV-vermogen. Anderzijds wordt de stooklijn voor ruimteverwarming doorheen het gehele jaar aangehouden, wat voor een hogere energievraag zorgt buiten het stookseizoen bij afname van sanitair warm water.

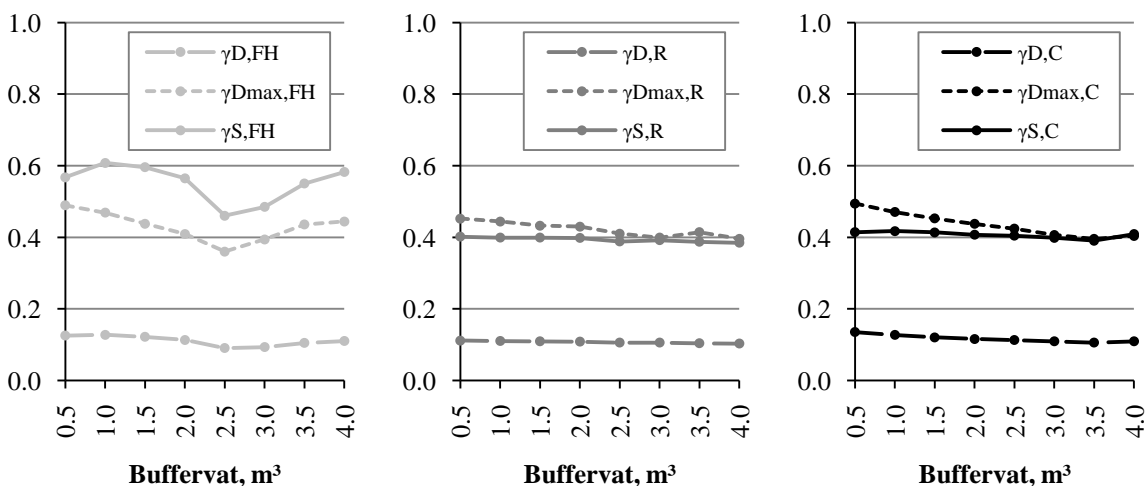


Figuur 6. Dekkingsgraad  $\gamma_D$ ,  $\gamma_{D,max}$  en  $\gamma_S$  (-) voor een woning met vloerverwarming [links], lage-temperatuurs radiatoren [midden] en een combinatie van beide [rechts] als functie van de grootte van het PV systeem (kWp) wanneer een warmtepomp is gebruikt voor de warmteproductie en voor een opslagvat van 1.0 m<sup>3</sup>. De pijl bij de kruising van  $\gamma_S$  en  $\gamma_D$  stemt overeen met een nul-energiewoning waarbij de totale jaarlijkse energievraag gelijk is aan de jaarlijkse energielevering.

#### Invloed van de grootte van het opslagvat

De grootte van het opslagvat kan een grote invloed hebben op de dekkingsgraad van de PV-installatie doordat ze een verschuiving van de vermogensvraag in de tijd toelaat via thermische opslag. Echter (zie figuur 7) is geen eenduidig verband merkbaar tussen de grootte van het opslagvat en de dekkingsgraad. Bij de systemen met radiatoren of met een combinatie van vloerverwarming en radiatoren is een licht dalende trend van de dekkingsgraad merkbaar bij een stijgend tankvolume, maar deze is vooral te wijten aan de grotere energievraag (zie figuur 3) die hiermee gepaard gaat. De bekomen resultaten voor vloerverwarming tonen de mogelijkheid tot optimalisatie doordat een maximum en minimum merkbaar zijn. Echter speelt hier een ander aspect een belangrijke rol, met name de regeling van de gehele installatie. Het voorzien van de mogelijkheid tot thermische opslag heeft weinig tot geen effect indien ze niet gepaard gaat met een aangepaste regelstrategie van het opslagvat of de installatie [28].

De grootte van het opslagvat kan een grote invloed hebben op de dekkingsgraad van een PV-installatie doordat ze een verschuiving van de vermogensvraag in de tijd toelaat, maar men mag hierbij het aspect van de totale energievraag niet verwaarlozen. Grotere opslagvaten tonen een grotere energievraag door stijgende warmteverliezen.



Figuur 7. Dekkingsgraad  $\gamma_D$ ,  $\gamma_{D,max}$  en  $\gamma_S$  (-) voor een woning met vloerverwarming [links], lage-temperatuurs radiatoren [midden] en een combinatie van beide [rechts] in functie van de grootte van het opslagvat (m<sup>3</sup>) wanneer een warmtepomp is gebruikt voor de warmteproductie en voor een PV-systeem van 4.0 kWp.

## DISCUSSIE

Deze studie toont dat de mogelijke synergie tussen de lokale elektriciteitsopwekking door middel van een gebouwgeïntegreerde PV-installatie en het gebruiksprofiel afhangt van de aanwezige toestellen, de installatie voor ruimteverwarming en sanitair warm water, en van het geïnstalleerde PV piekvermogen.

Binnen dit werk werd de invloed van of de samenwerking met een gebouwgeïntegreerd PV-systeem in een individuele woning begroot vanuit een vereenvoudigd, eerder (macro-) economisch standpunt, door middel van een dekkingsgraad. Indien we mogelijke synergie tussen de aanwezige PV-installatie en de energievraag van een gebouw optimaal willen benutten om de energievraag van het gebouwbestand te doen verminderen, lijkt een verdere focus op het elektrische aspect noodzakelijk. Niet enkel de dekkingsgraad, maar ook (of vooral) de piekbelasting, de kwaliteit van de in het elektriciteitsnet geïnjecteerde elektriciteit, de netspanning en -frequentie, aanwezigheid van opslagcapaciteit, de voorspelbaarheid van lokale energielevering, etc. spelen hier een belangrijke rol en dienen geïntegreerd te worden in modellen. Optimalisatie van gebouwen of het gebouwbestand ter reductie van de energievraag wordt zo een domeinoverschrijdend vraagstuk waarbij de uitdaging zowel op het niveau van het individueel gebouw als op het niveau van de wijk ligt.

## CONCLUSIES

Een woning met een gebouwgeïntegreerd PV-systeem, elektrische toestellen, verlichting en elektrisch gegenereerde ruimteverwarming en sanitair warm water door middel van een warmtepomp werd gemodelleerd in TRNSYS.

Het niet gelijktijdig zijn van elektriciteitsvraag in de woning en aanbod van het PV-systeem resulteert in elektriciteitsproductie die terug in het net wordt geïnjecteerd. De gelijktijdigheid van beide (of het gebrek hieraan) werd het elektriciteitsnet gebruikt als virtuele opslag voor de geproduceerde energie door middel van het aanwezige PV-systeem. Dit werd begroot door een dekkingsgraad.

Deze studie toont aan dat het warmteafgiftesysteem een invloed heeft op de mogelijke synergie met het aanwezige PV-systeem. De energievraag van een traag systeem zoals vloerverwarming lijkt hier beter overeen te komen met de lokale PV-energielevering doordat minder pieken in de vraag worden geïntroduceerd. Echter moet steeds ook de totale energievraag en de resulterende SPF in acht worden genomen. De mogelijkheid van energieopslag in een groot buffervat toont weinig tot geen invloed te hebben op de resultaten indien deze opslagmogelijkheid niet optimaal wordt benut door een aangepaste regeling.

De resultaten van deze studie tonen dat verdere optimalisatie van gebouwen met lokale energieproductie ter bekoming van een nul-energie woning een ingewikkeld multi-parameter vraagstuk is dat meerdere onderzoeksdomeinen en -disciplines omvat, waarbij ook het elektriciteitsnet tussen de verschillende gebouwen een belangrijke rol kan spelen.

## DANKWOORD

De auteurs danken het K.U.Leuven Energieinstituut voor de financiële steun die deze studie mogelijk maakte binnen het project 'Geoptimaliseerde energienetwerken in gebouwen'.

## REFERENTIES

- [1] The European Parliament, "P6\_TA-PROV(2009)0278 - Energy performance of buildings (recast) \*\*\*I, European Parliament legislative resolution of 23 April 2009 on the proposal for a directive of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast)," 2009, p. 51.
- [2] P. Torcellini, S. Pless, M. Deru, and D. Crawley, "Zero-energy buildings: A critical look at the definition ; Preprint," *ACEEE Summer study, Pacific Grove, California, August 14-18, 2006*, 2006, p. 15.
- [3] European Council For An Energy Efficient Economy (eceee), "Net zero energy buildings: definitions, issues and experience," 2009, p. 28.
- [4] European Heat Pump Association, "Outlook 2010 European Heat Pump Statistics - Summary," 2010.
- [5] EurObserv'ER, "Baromètre photovoltaïque / Photovoltaic barometer: 9 533.3 MWc dans l'EU / in the EU.," *Systèmes solaires - Le journal de photovoltaïque*, vol. 1, 2009, pp. 72-103.
- [6] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D'haeseleer, "Distributed generation: definition, benefits and issues," *Energy Policy*, vol. 33, 2005, pp. 787-798.
- [7] T. Vu Van, A. Woyte, J. Soens, J. Driesen, and R. Belmans, "Impacts of distributed generation on distribution system power quality," *7th International conference electrical power quality and utilisation, 17-19 September 2003*, 2003, pp. 585-592.
- [8] D. Houseman, "True integration challenges for distributed resources in the distribution grid," *20th International conference on electricity distribution, 8-11 June 2009*, 2009, p. Paper n°0012.

- [9] Solar Energy Laboratory, "TRNSYS 16 - A transient system simulation program," 2009.
- [10] EN 12831, "Heating system in buildings. A method for calculation of the design heat load.," 2003.
- [11] prEN 15377, "Heating systems in buildings. Design of embedded water based surface heating and cooling systems. Part I - Determination of the design heating and cooling capacity. Part II - Design, dimensioning and installation. Part III - Optimizing for use of renewabl," 2005.
- [12] EN 442, "Specification of radiators and convectors. Part 1 - Technical specifications and requirements. Part II - Test methods and rating. Part III - Evaluation and conformity.," 2003.
- [13] I. Richardson, M. Thomson, and D. Infield, "A high-resolution domestic building occupancy model for energy demand simulations," *Energy and Buildings*, vol. 40, 2008, pp. 1560-1566.
- [14] R. Spur, D. Fiala, D. Nevrala, and D. Probert, "Influence of the domestic hot-water daily draw-off profile on the performance of a hot-water store," *Applied Energy*, vol. 83, 2006, pp. 749-773.
- [15] U. Jordan and K. Vajen, "Realistic domestic hot-water profiles in different time scales - Final raport," 2001, p. 18.
- [16] A. Almeida, P. Fonseca, R. Bandeirinha, T. Fernandes, R. Araújo, U. Nunes, M. Dupret, J.P. Zimmermann, B. Schlomann, and E. Gruber, "REMODECE - Residential monitoring to decrease energy use and carbon emissions in Europe - Final report," 2008, p. 96.
- [17] S. Firth, K. Lomas, A. Wright, and R. Wall, "Identifying trends in the use of domestic appliances from household electricity consumption measurements," *Energy and Buildings*, vol. 40, 2008, pp. 926-936.
- [18] D. Liu, W.R. Chang, and J.Y. Lin, "Performance comparison with effect of door opening on variable and fixed frequency refrigerators/freezers," *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, 2004, pp. 2281-2292.
- [19] M. Stokes, M. Rylatt, and K. Lomas, "A simple model of domestic lighting demand," *Energy and Buildings*, vol. 36, 2004, pp. 103-116.
- [20] I. Glorieux and J. Vandeweyer, "Statistische studie nr110 - 24 uur ... Belgische tijd, een onderzoek naar de tijdsbesteding van de Belgen," 2002.
- [21] G. Wood and M. Newborough, "Dynamic energy-consumption indicators for domestic appliances: environment, behaviour and design," *Energy and Buildings*, vol. 35, 2003, pp. 821-841.
- [22] TPDCB, "The power consumption database," 2010.
- [23] Meteotest, "METEONORM Version 6.1 - Edition 2009," 2008.
- [24] J.A. Duffie and W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd ed.*, Wiley, 1991.
- [25] T. Huld and M. Suri, "PVGIS, PV Estimation Utility," 2010.
- [26] VREG Vlaamse Reguleringsinstantie Voor De Elektriciteits- en Gasmarkt, "Marktmonitor 2009," 2010, p. 82.
- [27] Danish Energy Agency, "Washing machines, Driers and Dishwashers - Final Report," 1995, p. 76.
- [28] R. De Coninck, R. Baetens, B. Verbruggen, D. Saelens, J. Driesen, and L. Helsen, "Modelling and simulation of a grid connected photovoltaic heat pump system with thermal energy storage using Modelica," *proceedings of the 8th International Conference on System Simulation in Buildings*, P. Andre, S. Bertagnolio, and V. Lemort, Liege: 2010.